云 南 植 物 研 究 2001, 23 (1): 109~114
Acta Botanica Yunnanica

云南南亚热带地区冬玉米种植的生态生理学研究*

张石宝，李树云，李存信
（中国科学院昆明植物研究所，云南 昆明 650204）

摘要：1996~1998年，在蒙自县草坝进行了玉米冬播栽培的试验和大面积种植，并连年获得高产。主要是：1. 冬播玉米有明显较长的生育期。2. 冬玉米的叶片发展和光热资源有较好的匹配，构成了冬播玉米高产的基础。3. 灌浆中期全天平均光通量密度为1391.8 $\mu E \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$，植株实际截获87.6%的总通量。底层相对较高的透光延缓了叶片的衰老，为灌浆期总干物质生产提供了较好的条件。4. 冬播玉米开花后的干物质生产量占总干物质量的72.1%，有利于籽粒生产。5. 冬播玉米灌浆期生产的同化物最终有12.78%存留于营养体中，表明库容是生产力的限制因素，扩大库容可使其籽粒产量进一步提高。

关键词：玉米冬播；叶面积；干物质生产与分配；光截获
中图分类号：Q 945 **文献标识码**：A **文章编号**：0253-2700(2001)01-0109-06

Study on Ecophysiology of Winter Maiz (*Zea mays*) in South Subtropical Region of Yunnan

ZHANG Shi-Bao, LI Shu-Yun, LI Cun-Xin
(*Kunming Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences*, Kunming 650204, China)

Abstract: From 1996 to 1998, several experiments and mass cultivation of winter maize are carried out in Caoba, Mengzi County, Yunnan. High yield were successily obtained in 3 years. The main reasons are as follows: 1. The growth period of winter maize is obviously longer than others. 2. The LAI development of winter maize match well with the resource of light and heat in Caoba. This is the basis of high yielding of winter maize. 3. At mid-filling stage, the mean light flux density (LFD) per day is 1391.8 $\mu E \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$. The plants intercept and capture 87.6% of the total LFD. Enough light at basal layer can delay the leaf senescence, which provides better conditions for the total dry matter production of grain at filling period. 4. The amount of dry matter production for winter maize after silking account for 72.1 % of the total dry matter. This is advantageous to grain production. 5. Dry matter 12.78% produced at filling stage has remained in the vegetative organs, indicates that the source capacity is a limiting factor of obtaining a high yield. Enlarging the source capacity may further increase the yield of winter maize.

Key words: Sowing corn in winter, Leaf area, Production and partition of dry matter, Light interception and capture.

玉米是一种喜温作物，全生育期都需要较高的温度，其生物学下限温度为6 ℃，冻害

* 基金项目：云南省"九五"科技攻关和云南省一中科院科技合作项目（95A7-2）。
收稿日期：1999-08-19，1999-11-01 接受发表

温度-2 ℃~3 ℃，全生育期需积温 2 500 ℃（Miedema，1982；北京农大，1982）。一般认为玉米冬播栽培只适宜于热带和小部分亚热带地区（崔读昌等，1991），1月份平均温度在 12 ℃~13 ℃以上的地区可以种植（韩湘玲，1991）。

在热带和亚热带南部地区国内外均有玉米冬播种植，如印度、孟加拉国、尼泊尔、越南、墨西哥、巴西等，国内在海南、广东、广西以及云南热区等地。在越南将其列为对粮食生产能作出贡献的重要而经济的解决办法（Tran-Hang & Do，1988）。印度小区试验折合 7 270 kg/ha（Bangrawa，1988）。在云南南瑞瑞丽有 117.5m^2 的面积上达到亩产吨粮的报道（戴大国，1998）。

对玉米冬播栽培的农艺学（如耕作、播期、种植模式和密度、施肥、灌溉、虫害和杂草防治、品种、间作等）均有研究（Singh，1988），但对其生态生理学的专项研究尚未见报道。我们已在万亩（666.7ha）规模上达到了 7 500 kg/ha 的平均产量。本文从冬播玉米的生态生理学角度分析在云南省南亚热带地区冬播玉米高产形成的基础，为今后推广冬播玉米提供理论依据。

1 试区的地理位置和气象条件

试区设在云南省蒙自县草坝镇，该地位于 N23°23′和 E103°23′偏北附近，北回归线由南缘穿过，海拔 1 260 m，属南亚热带的北缘（李世奎，1991）。据当地气象站资料，多年平均值为：年均温 18.5℃，年降水 815.8 mm，年辐照总量 133.8 kcal/cm^2，年均日照时数 2 234 h，霜期 41.6 d（5/12~19/1），霜日 5.4 d。蒙自坝区主要气象因子的年分布如表 1。

表 1 蒙自坝区主要气象因子的年分布

Table 1 Annual distribution pattern of main meteorological factors in Mengzi Plain

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	全年 year
月均温（℃） monthly mean temperature	12.1	14.0	18.0	21.0	22.6	22.8	22.7	22.0	21.0	18.7	15.4	12.6	18.5
月均降水量（mm） monthly mean rainfall amount	12.7	16.9	25.8	44.4	90.6	126.9	157.0	159.7	86.4	54.7	27.6	15.9	815.8
月均日照时数（h） monthly mean sunshine duration	215.1	204.6	235.0	229.2	206.3	140.3	150.3	153.8	160.6	150.3	179.3	209.2	2234.1
月辐照量（kcal/cm^2） monthly solar radiation amount	9.5	10.3	13.1	13.7	14.0	11.5	11.6	11.2	10.8	9.8	8.9	9.3	133.8

由表 1 中的温度资料看，蒙自坝区种植冬播玉米的热量条件十分勉强，特别是营养生长期有霜冻威胁，露地种植风险太大，即使无霜冻的年份，低温也将延长生长期，会影响中稻种植。

2 材料与方法

试区土壤为沼泽土。pH 值 6.5~7.0，有机质含量为 2%~3%，总氮含量 0.136%，速效磷（P_2O_5）35.0×10^{-6}，速效钾（K_2O）142.0×10^{-6}。

参试品种为京杂 6 号，种植面积 1 667 m^2，以邻田作平行取样田，结果用两年的平均值。

播期：1996～1997 年度为 12 月 4 日，1997～1998 年为 12 月 14 日，收获期分别为 5 月 13 日和 14 日。

种植规格：起墒开沟点播，墒面宽 1.4 m，沟宽 0.6 m，每墒 3 行，行距 0.5 m，株距 0.2 m，双粒点播。采用 0.08 mm 农用薄膜覆盖墒面。在立春前后破膜引苗，定苗 67 500～75 000 株/ha。

施肥：总氮用量 180 kg/ha，底肥 45 kg/ha，追肥 2 次，引苗后 90 kg/ha，大喇叭口期 45kg/ha。磷肥 600 kg/ha 普钙（约合 105 kg P_2O_5/ha）作底肥一次施入。

灌水：播前灌水造墒。破膜引苗、大喇叭口期和灌浆中期各 1 次。播前造墒用水每亩约 60 m^3，以后每次约 30～40 m^3。

取样：花丝期、成熟（收获）期各 1 次，每次 5 株，分成叶、鞘、茎、雄穗、苞叶、籽粒，在 80℃下烘干 48 h 称重。

测量：三叶期、破膜引苗、花丝期、灌浆中期、成熟期（收获）采用系数法测量叶面积（长×宽×0.75），并计算叶面积指数和叶面积持续期。灌浆中期用 LI－188 型量子－辐照－光度计（美国 LI－COR 公司），测群体（距地面 0、60、120 cm）和群体外光能分布的日进程。反射光测冠层顶部、冠层东、西向的 3 个值，取平均。三叶期和破膜引苗时实测地温（5 cm）；花丝期后采用气象站资料，破膜前用地温计算积温，破膜后用气象站记录，以 8℃定为生长发育下限温度（热比埃，1983）。

3 结果和讨论

3.1 热量条件和冬播玉米的生长发育

在蒙自县草坝进行玉米冬播栽培时，营养生长期温度较低（12.1℃～18.0℃），而灌浆期处于其生长的适温范围（21℃～22.6℃），由于营养生长期的非伤害性低温造成冬播玉米生长速度减慢，使其从播种到开花吐丝的时间较长（表 2）。京杂 6 号在北京 5 月上旬播种时，播种—抽雄为 64 d，≥0℃的积温为 1549℃（聂景方等，1984），而在草坝冬播（12 月 10 日）时，即使覆膜也需 111 d。灌浆期分别为 60 d 和 45 d，全生育期相差 1 个月左右。

表 2　冬播玉米不同生育期的天数和积温与北京春播的（括号内）比较

Table 2　Comparison of duration and accumulated temperature in different growth stage between sowing corn in winter at Caoba and sowing corn in spring at Beijing (in bracket)

生育期 period of growth and development	日历时（月．日） calendar time (month . day)	天　数 day temperature (℃)	≥10℃积温（℃） ≥10℃ accumulative temperature (℃)	≥8℃积温（℃）* ≥8℃ accumulative
播种——花丝 sowing—silking	12.10～03.10	111 (64)	1972 (1459)	1084 (1037)
花丝——收获 silking—harvest	04.01～05.15	45 (60)	986 (1200)	626 (720)

* 用聂景方等（1984）的资料计算得出：≥0℃积温 －（天数×8）

* From NIE Jing－Fang's data ; ≥0℃ accumulated temperature—(day×8)

从≥0℃的积温来看，在草坝冬播玉米京杂 6 号，从播种到花丝期的积温比北京春播

的高（相差423℃）。看来草坝冬季较低的日均温，使玉米对热量的使用效率较低。采用“热单位”计算相差不大。一般认为玉米的生物学下限温度6~10℃，用≥8℃的累积度日则草坝冬播时为1084度．日，北京春播为1037度．日。灌浆期则相反，草坝冬播为45天和720度．日，这和草坝此时较大的日较差（≥12℃）更有利于干物质累积（灌浆），从而提高了热量利用效率有关。

3.2 叶面积的发展和与光环境的匹配

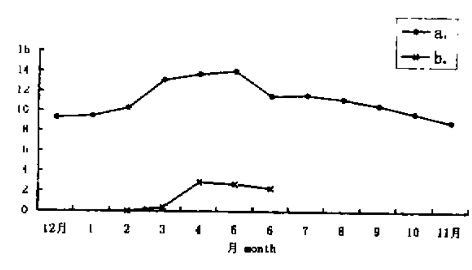


图1 叶面积指数的发展与太阳辐照的匹配

1. 太阳辐照量（kcal/cm2） 2. 叶面积指数

Fig.1 The match of LAI development with solar radiation

1. Amount of solar radiation（kcal/cm^2） 2. LAI

截获和利用太阳辐射能是作物干物质生产的基础，而截获和利用太阳能的主要器官是叶片。因此，在玉米生产中其冠层的叶面积和入射太阳能的协调起决定性作用。在灌浆期叶面积和辐照强度及光期长短的匹配对谷物籽粒产量尤为重要。一般认为在有最高太阳辐照时期叶面积大能获得高的产量（Gardner，1985）。

图1是利用表1中资料绘制的全年光能数分布和两年测得的冬播玉米平均叶面积指数发展的匹配。从而可以看出，在太阳辐照量最大的3、4和5月份，冬玉米的叶面积指数维持均在2.0以上。灌浆开始时叶面积指数为3.1，直到收获时仍有2.3。这种较好的叶面积和光环境的匹配构成了冬玉米较高生产力的基础。

3.3 冠层内的光分布

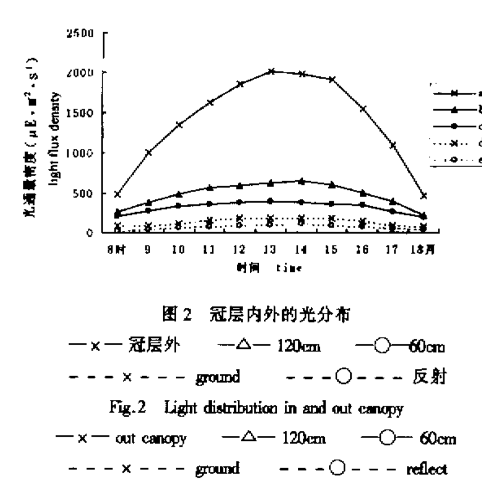


图2 冠层内外的光分布

—×— 冠层外 —△— 120cm —○—60cm

- - - × - - - ground - - - ○ - - - 反射

Fig.2 Light distribution in and out canopy

—×— out canopy —△— 120cm —○— 60cm

- - - × - - - ground - - - ○ - - - reflect

图2是灌浆中期（1997年4月20~21日）测得的冬播玉米冠层内不同层次的量子通量密度和冠层的光反射，此时，叶面积指数为2.7，功能叶12片，地上20 cm处即有功能叶。由图2可以看出，在距地面120 cm处（株高为180 cm左右，此处即冠层的上部60 cm）截获近70%的入射太阳幅照，120~60 cm层截获20%左右，投射到地面的约8.5%~10%。在穗位层（60~120 cm）的量子通量密度全天均在200~400 μE·m^{-2}s^{-1}，即均在玉米叶的光合作用的光补偿点（115 μE·m^{-2}s^{-1}，Gardner等，1985）以上。在0~60 cm层在下午4点光强（130~190 μE·m^{-2}·s^{-1}）也未低于光补偿点。灌浆中期冠层内的上述光分布既有利于整个冠层的光合作用，也减缓了叶片的衰老，均对冬播玉米籽粒产量有利。下部叶片仍可进行光合作用，而这部分叶的光合产物又是主要供应根系的，也使得根系活性能相对延长，对灌浆期的水肥吸收有好处。

3.4 干物质生产和光能利用效率

表3列出了冬播玉米京杂6号玉米不同生育期的地上部干物质生产状况和入射太阳辐射总辐照量，并以每克干物质含4千卡热量计算出光能利用效率。

表3 冬播玉米地上部干物质生产和光能利用效率

Table 3 Dry matter production above ground parts and light energy utilization of corn sowing in winter

	干物质产量 ($g. m^{-2}$) dry matter weight	生长速率 ($g. m^{-2}d^{-1}$) growth rate	净同化速率 ($g. m^{-2}d^{-1}$) net assimilative rate	总入射辐照 ($kcal. cm^{-2}$) total incident solar radiation	日入射辐照 ($cal. cm^{-2}d^{-1}$) daily incident solar radiation	光能利用率 (%) light energy utilization
播种——花丝 sowing—silking	574.7	5.18	3.44	38.8	349.5	0.80
花丝——收获 silking—harvest	1480.0	32.89	12.65	20.4	453.3	2.90
播种——收获 sowing—harvest	2054.7	13.16	8.74	59.2	381.9	1.39

表3表明，冬播玉米花丝期以前生产的干物质占总物质的27.9%，这与一般春播玉米花丝期前后基本相等（Tollenaear & Bruulsema，1988）显然不同，在生长速率、净同化速率以及光能利用效率上也同样是花丝期前比花丝期后低得多。干物质生产和光能利用的这种特征，主要是前期低温所造成的较小叶面积指数（表1，图1）和每天较低的入射照量（前期为349.5卡 $.cm^{-2}.d^{-1}$，后期为453.3卡 $.cm^{-2}.d^{-1}$）所致。冬播玉米花丝期以后（灌浆期）较大的叶面积指数和较好的光热条件显然对干物质生产和光能利用有利。

3.5 干物质的分配和产量

玉米籽粒的干物质主要来自于开花后的光合产物，开花前贮存的碳水化合物对籽粒干重的贡献不到10%（Simmons and James，1985），因此开花吐丝后生产的同化物分配于籽粒的比例大小对玉米产量起决定性的作用。而灌浆期光合产物对籽粒的分配又受库大小的调节（Hunter等，1977）。表4所列数据为1996～1997和1997～1998年度测量的平均值。

表4资料表明，除雄穗外，冬玉米各部分在灌浆期干重都增加。营养体（叶、鞘、茎和枯死部分）增重占总增重的12.78%，总量为189.2 $g. m^{-2}$；果穗增重1302.0 $g. m^{-2}$，占总增重的87.97%，其中籽粒干重为871.6 $g. m^{-2}$，占总增重的58.89%，籽粒干重占总干重的比例（收获指数）为42.4%，折合约每ha烘干籽粒重为8.71千克（581 00 kg/m^2）。

由于灌浆期营养体尚增重12.78%，说明此时叶片的光合作用不是籽粒的限制因素，也可看出冬播玉米的生长潜力尚未完全发挥。如果能将籽粒对灌浆期生产光合产物的利用率提高到如报道的80%左右的比例（Cirilo & Andrade，1994），那在草坝地区栽培的冬玉米产量可提高20%以上。关键在于提高库容能力，现在每平方米土地为3 080粒，高产田可达到4000粒左右，实产达到12 000 kg/ha（800kg/亩）左右，这样冬播玉米就可以充分地利用当地的光热资源，得到更高的籽粒产量。

表4 开花吐丝前和后冬播玉米地上部各器官的干物重（g. m²）和占总增重的比例（%）

Table 4 Dry matter weight of each organ of above ground parts and it account for total increase weight in pre – silking and meta – silking for corn sowing in winter

	叶 leaf	鞘 sheath	茎 stem	枯死 diedpart	雄穗 malespike	苞叶 hulk	穗轴 corncob	籽粒 grain	总 total
花丝期 silking stage	174.6	94.4	170.8	5.2	40.7	58.2	30.8	0	574.7
收获期 harveststage	198.0	121.4	272.8	42.0	29.5	269.5	249.9	871.6	2054.7
增重 increasing weight	23.4	27.0	102.0	36.8	– 11.2	211.3	219.1	871.6	1480.0
占总增重% % of total increasing weight	1.58	1.82	6.89	2.49	– 0.75	14.8	14.8	58.89	—

致谢 参加工作的人员还有普文法、胡丽华、尹树华、普琼芬、龙丽仙等同志。

〔参 考 文 献〕

北京农业大学，1982. 农业气象学〔M〕. 北京：科学出版社，192 ~ 210

李世奎，1991. 气候资源区划与农业布局. 见：程纯枢主编，中国的气候与农业〔M〕. 北京：气象出版社，53 ~ 76

聂景方，邓根云，李健等，1984. 玉米灌浆过程与光热条件〔J〕. 北京农业科学，5：11 ~ 17

崔读昌，1991. 气候与粮食作物. 见：程纯枢主编，中国的气候与农业〔M〕. 北京：气象出版社，205 ~ 223

韩湘玲，1991. 气候与种植制度. 见：程纯枢主编，中国的气候与农业〔M〕. 北京：气象出版社，127 ~ 162

戴大国，1998. 杂交冬玉米亩产吨粮技术〔J〕. 云南农业，10：15

Cirilo A G, Andrade F H, 1994. Sowing date and maize productivity: I. Crop growth and dry matter partitioning〔J〕. *Crop Science*, 34: 1039 ~ 1043

Gardner F P, 1985. Carbon fixation by crop plant. in Physiology of Crop Plant〔M〕, The Iowa State University Press, 34 ~ 57

Hunter R. B, Tollenaar M T, Breuer C M, 1977. Effects of photoperiod and temperature on vegetative and productive growth of a maize hybrid〔J〕. *Can J Plant Sci*, 54: 1127 ~ 1133

Tran – Hang J Y, Do Hun Quoc, 1988. Intensitive technology package for winter maize crop in dry and wet soil. in Vietnam〔C〕. Proceeding of the third Asian regional maize workshop, MEXICO CIMMYT, 175 ~ 185

Miedema P, 1982. The effects of low temperature on *Zea mays*〔J〕. *Advances in Agronomy*, 45: 93 ~ 128

Simmons S R, James R J, 1985. Contriobution of pre – silking assimilate to grain in maize〔J〕. *Crop Sci*, 25: 1004 ~ 1006

Singh R, 1988. Twenty five years of maize research in Bihar (Indian) (1959 ~ 1984)〔R〕. From Maize Abstracts, 004 ~ 03075

Tollennaar M, Bruulsema T W, 1988. Efficiency of maize dry matter production during periods of complete leaf areas Expansion〔J〕. *Agronomy J*, 80: 580 ~ 585